

**WEST**

Generate Collection

Print



L10: Entry 1 of 2

File: JPAB

Mar 19, 1996

PUB-NO: JP408071919A  
DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 08071919 A  
TITLE: WATER JET PEENING WORK DEVICE

PUBN-DATE: March 19, 1996

## INVENTOR-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

SATOU, KAZUNORI

MANABE, FUMIO

SHIGEHIO, KATSUYA

## ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME

COUNTRY

BABCOCK HITACHI KK

APPL-NO: JP06210112

APPL-DATE: September 2, 1994

INT-CL (IPC): B24 C 1/10; C21 D 7/06

## ABSTRACT:

PURPOSE: To provide a water jet peening work device which can solve difficulties arising from the work in the water by monitoring whether the work conditions on which residual stress is improved sufficiently are provided or not during the work.

CONSTITUTION: In a so-called water jet peening work device which performs the improvement of residual stress, cutting, drilling of a hole or cleaning of a structure in the water by making high speed water jet steam in the water which accompanies cavitation collide with, a sensor 10 for judging the collision condition of jet stream against an objective section to be machines and appropriateness of work condition such as injection pressure or injection collision time in a nozzle 1 is arranged in the vicinity of an objective member 6 to be processed.

COPYRIGHT: (C)1996,JPO

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-71919

(43) 公開日 平成8年(1996)3月19日

(51) Int.Cl. <sup>9</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
B 2 4 C 1/10	G			
// C 2 1 D 7/06	Z	8821-4K		

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平6-210112

(22) 出願日 平成6年(1994)9月2日

(71) 出願人 000005441

パプコック日立株式会社

東京都千代田区大手町2丁目6番2号

(72) 発明者 佐藤 一教

広島県呉市宝町3番36号 パプコック日立

株式会社呉研究所内

(72) 発明者 真鍋 二三夫

広島県呉市宝町6番9号 パプコック日立

株式会社呉工場内

(72) 発明者 重弘 勝矢

広島県呉市宝町6番9号 パプコック日立

株式会社呉工場内

(74) 代理人 弁理士 武 嗣次郎

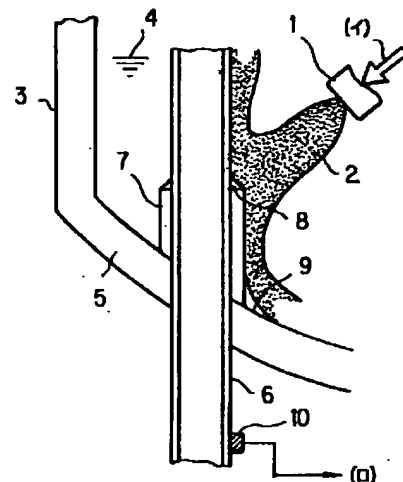
(54) 【発明の名称】 ウォータージェットピーニング施工装置

(57) 【要約】

【目的】 残留応力が十分に改善される施工条件になっているか等を施工中に監視することで、水中施工に伴う困難さを解決することができるウォータージェットピーニング施工装置を提供する。

【構成】 キャビテーションを伴う水中高速水噴流を衝突させることにより、水中構造物の残留応力改善、切断、掘孔あるいは洗浄等を行う、いわゆるウォータージェットピーニング施工装置において、加工対象部位に対する噴流の衝突状態、ノズル1における噴射圧力あるいは噴射衝突時間など施工状態の適切さを判断するためのセンサ10を加工対象部材6近傍に配置した。

【図1】



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 キャビテーションを伴う水中高速水噴流を衝突させることにより、水中構造物の残留応力改善、切断、掘孔あるいは洗浄等を行う、いわゆるウォータージェットピーニング施工装置において、加工対象部位に対する噴流の衝突状態、ノズルにおける噴射圧力あるいは噴射衝突時間など施工状態の適切さを判断するためのセンサを加工対象部材近傍に配置したことを特徴とするウォータージェットピーニング施工装置。

【請求項2】 請求項1記載において、前記センサをアコースティック・エミッションセンサとすることを特徴とするウォータージェットピーニング施工装置。

【請求項3】 請求項1記載において、軽水炉型の原子炉に挿設する炉内外導管部に前記センサを設けたことを特徴とするウォータージェットピーニング施工装置。

【請求項4】 請求項3記載において、前記センサをアコースティック・エミッションセンサとすることを特徴とするウォータージェットピーニング施工装置。

【請求項5】 請求項2および4記載において、アコースティック・エミッション信号から音響パワーIを求め、I値を基準として、ノズルの位置や加工対象部に対するノズルの姿勢である噴流の衝突状態、噴射圧力もしくは噴射時間のうち少なくとも一つ以上の噴流衝突条件を変更する制御手段を備えたことを特徴とするウォータージェットピーニング施工装置。

【請求項6】 請求項4記載において、当該加工対象導管に隣接する導管へも、アコースティック・エミッションセンサを設置したことを特徴とするウォータージェットピーニング施工装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、水中における高速水噴流に発生するキャビテーションを利用し、構造物をピーニング施工する、いわゆるウォータージェットピーニング技術に係わり、特に遠隔操作における水中ピーニング施工の状態を外部から監視する技術に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】 応力腐食割れ（SCC）を起こすポテンシャルのある熱影響部（溶接部）を有する既設構造物の表面残留応力は、小さな鋼球を気流の勢いで吹きつけるショットブラスト、砂粒を用いるサンドブラスト、氷粒を用いるクライオブラスト等によるピーニング処理により、残留応力を引っ張り方向（亀裂を拡大させる方向）から圧縮方向へ改善する対策が取られる。このようなピーニング技術は、残留応力対策あるいは表面硬化処理として、各種機械構造物や部品加工に広く用いられている。

【0003】 しかし、このような操作のできない環境にありながら、是非ともピーニングしなければならない構

造物も多い。例えば、冷却水を張った状態の特殊な熱交換器や反応槽、あるいは海洋構造物の溶接部は、何れも水を除いての作業は物理的あるいは経済的に大変難しい。

【0004】 また、ブラスト粒子を水中から全量回収することは不可能に近い。氷粒を用いれば回収は不要であるが、経済的なメリットは出にくい。なお、ピーニング施工は、上記応力腐食割れのみならず、疲労強度の向上に対しても効果的である。

10 【0005】 高速ウォータージェットの利用は、ユニークな加工、探鉱あるいは洗浄技術として広く知られるが、これを表面応力改善に利用する試みがウェスチングハウス・エレクトリック社により行われた（特開昭62-63614号公報）。

【0006】 水噴流によるピーニングは、水冷効果もあって局所的な温度上昇を防げるというメリットもある。しかしこれは、水噴流の軸動力を有効に利用できる大気中の作業であり、この技術を水中施工法としてそのまま展開できる保証はない。

20 【0007】 水中では、噴流の軸動圧力の減衰がかなり早い。これは、周囲水の抵抗と同じ液相であるがために、噴流の水中への拡散が早いことに起因する。水中において、気相中水噴流なみの軸動圧力を得るためには、従来式の高圧ポンプでは対応しきれず、超高圧装置が必要になり、コスト的に大変不利な技術になってしまう。一方、水中における高速水噴流には、噴流の乱れと、それと周囲水との剪断作用の複合効果により図19に示すように激しいキャビテーションが発生する。

30 【0008】 なお、図19において、1801はノズル、1802は高圧水、1803は周囲水、1804は液芯（コア）、1805はキャビテーションクラウド、1806は渦キャビテーション、1807は残存気泡である。

【0009】 キャビテーションを促進し、多量に発生する気泡の崩壊・衝撃圧力、特に渦キャビテーションの気泡列の衝突による衝撃圧を有効に利用できれば、気相中水噴流なみのピーニング効果をさほど高くない噴射圧力で達成できる。

40 【0010】 このように、水中高速水噴流を適正な条件で施工対象物に衝突させれば、キャビテーション気泡崩壊時の衝撃パルスの繰り返しにより、ショットピーニングと同様の残留応力改善効果を得ることができる。

## 【0011】

【発明が解決しようとする課題】 図16は水中高速水噴流を噴射する際に用いるノズルの構造例を示すものである。

50 【0012】 このノズルは、高圧水供給流路1504から噴出孔1506にかけての径収縮部（しぼり部）1505におけるしぼり角度 $\theta$ が小さく、高圧水1502が緩やかに減圧加速されるタイプである。

【0013】なお、1501はノズル本体、1503は中心軸である。

【0014】図17もノズルの構造の一例を示すものである。

【0015】このノズルは、しぼり角度 $\theta$ が大きく、径収縮部(しぼり部)1605において、急激に減圧加速される。噴出孔1606において、強い縮流が生じやすく、図16に示したノズルに比べると、噴流に激しいキャビテーションが生じやすいものの圧力損失が大きく、ポンプに負荷が掛かりやすいというきらいがある。

【0016】なお、1601はノズル本体、1602は高圧水、1603は中心軸、1604は高圧水供給流路である。

【0017】図18はノズルから噴流軸に沿うスタンドオフ距離に沿うスタンドオフ距離と噴流のキャビテーションから発生する衝撃圧の分布を模式的に描いたものである。

【0018】スタンドオフ距離に対して、衝撃圧分布は2つのピークを有する分布となる。ノズル1701に近い第1ピークは、噴流のエネルギーが局部に集中する。この第1ピークは鋭く尖っており、スタンドオフ距離が少しでもずれると、衝撃圧のレベルは減少する。

【0019】一方、下流の第2ピークは、衝撃エネルギーが広く分散する。また、第2ピークの分布形状は緩やかであり、第1ピークとは異なり、スタンドオフ距離が多少ずれても衝撃圧のレベルは急変しない。

【0020】なお、1702は高圧水、1703はキャビテーションを伴う水中水噴流である。

【0021】前述した図19は水中水噴流の現象を模式的に描いたものである。第1ピークは、ノズル1801から噴出直後において、噴流中心の「液芯(コア)」1804が衝突する領域にほぼ相当する。第1ピークは、この「液芯(コア)」1804の変動とキャビテーションクラウド1805の成長とが連成した結果生じたものである。

【0022】一方、第2ピークは、キャビテーションクラウドが分裂し、噴流の界面剪断層において渦キャビテーション1806が活発に生成する領域にほぼ相当している。なお、第1ピークのスタンドオフ距離方向に対する位置は、噴射圧力が増加すると下流へシフトする。

【0023】以上のように、水中水噴流は空間的に大きく構造が異なるため、噴流の衝突位置が異なると、加工対象材料が受ける影響も全く異なってしまう。水中水噴流においては、ノズルの条件設定が極めて重要であるが、ノズルの水中位置決め操作(マニピレーション)は必ずしも容易ではない。

【0024】ノズルの位置決めに失敗すると、加工対象物に噴流が衝突しないことも起こりうる。また、上記した第1ピークは、壊食(エロージョン)を起こしやすいために残留応力改善には適していない。逆に、第2ピーク

は、噴流のエネルギーが広く分散するため水中切断や水中掘削には不敵である。

【0025】ところで、ウォータージェットピーニングによる水中施工の監視は、水中カメラを用いても可能である。しかし、水が濁って視界が不良な状況に対しては無力であるし、多量に発生するキャビテーションが視野を遮ってしまう。また、狭い箇所へは、カメラを付設したノズルを近づけにくいという問題がある。

【0026】本発明はこのような背景に基づいてなされたものであり、残留応力が十分に改善される施工条件になっているか等を施工中に監視することで、水中施工に伴う困難さを解決することができるウォータージェットピーニング施工装置を提供することを目的とするものである。

【0027】

【課題を解決するための手段】本発明においては、WJP(ウォータージェットピーニング)施工状態を監視し、その加工性能と信頼性を確保するために次のような手段を採用する。

【0028】AE(アコースティック・エミッション)センサを、容器外部にまで貫通している加工対象部材に設置し、AE信号を音響パワーIとして算出し、このIのレベルに基づいてWJPの施工状態を監視する。

【0029】音響パワーIが小さ過ぎれば、ノズルが加工対象部材に近接し過ぎているか、あるいは噴流が加工対象部材にうまく衝突していない、すなわち、「的はずれ」状態にあると判断される。このような場合には、施工を続けても、残留応力の改善効果が小さい。

【0030】対策として、マニピレータを駆動し、ノズルの位置決めを再調整する。また、Iが小さくなる一つの原因として、ノズルからの噴射圧力、即ちポンプの吐出圧力が低過ぎることも考えられる。ノズルの位置決めを調整しても、Iのレベルが低い場合にはこのようなケースも有り得るので、ポンプの噴射条件が誤って設定されていないか、またはリーク箇所等を再確認する。

【0031】音響パワーIが要求されるレベルよりも極端に大きな場合は、スタンドオフ距離xが、いわゆる前出した噴流衝撃圧の「第1ピーク」に相当する領域にある可能性がある。

【0032】このような時には、加工対象部材が壊食(エロージョン)や大規模な破壊といったトラブルを起こすおそれがあるので、「第2ピーク」相当のスタンドオフ距離まで加工部材からノズルを遠ざけるか、あるいは噴射圧力を下げることで対応する。

【0033】また、AE信号の周波数分布において、特定の周波数のレベルが圧倒的に卓越したり、あるいは周波数分布が激しく変動するように、明らかに異常な挙動と判断される変化が生じた場合は、加工対象部材に壊食(エロージョン)や亀裂発生、あるいは破壊等の極端な現象が生じる場合があるので、ポンプを緊急停止し、加

工部の点検を行う。

【0034】なお、上記した音響パワー I は、次のように定義される。

$$【0035】I = \sum (N_p)_j \cdot (P_p)_j^2$$

ここに、

(P<sub>p</sub>)<sub>j</sub>…音響パルス(イベントとも呼ばれる)の j 番目の大きさの振幅

(N<sub>p</sub>)<sub>j</sub>…音響パルスの j 番目の大きさの個数(事象数)

上記した AE 法は、圧延機の滑り軸受の損傷状態監視などに広く用いられている(例えば、「AE 法で設備診断や製品検査」日経メカニカル 1993/10-4, P. 30~)。

【0036】本発明は、この AE 法をウォータージェットピーニング法へ適用するものであり、AE 法を以下に述べる新規な評価手段として用いることに本発明の特徴がある。

【0037】(1)加工対象物に対する噴流の衝突状態の監視に適用すること。

【0038】(2)残留応力の改善効果(圧縮方向残留応力の発生)の確認に用いること。

【0039】(3) AE の事象信号データを基に、上記した音響パワー I 値を用いて評価すること。

【0040】

【作用】ノズルを加工対象面に近づけ過ぎた場合、例えばスタンドオフ距離  $x/D < 10$  ( $x$ : ノズルと加工対象面間のスタンドオフ距離、 $D$ : ノズルの噴出孔径)となった場合、音響パワー I の値は小さく、結局、残留応力の改善量  $\Delta\sigma$  ( $\Delta\sigma = \sigma_2 - (-\sigma_1)$ ),  $\sigma_2$ : WJP 施工後の圧縮残留応力、 $-\sigma_1$ : 施工前の引っ張り残留応力)も、必要な性能を満足しなくなる。

【0041】このような場合には、I の監視結果に基づき、ノズルを加工対象面から遠ざけねばならない。第 1 ピークの領域にほぼ相当する  $10 < x/D < 20$  の位置にノズルを設置した場合には、音響パワー I は急増する。

【0042】この第 1 ピークにおいては、水噴流のエネルギーが加工面の局部に集中するため、音響パワー I は  $10^{10}$  にも達することがある。 $\Delta\sigma$  を増加させる効果よりも、加工面に壊食(エロージョン)を起こす可能性があるため、残留応力改善施工には必ずしも適していない。むしろ、この第 1 ピークの利用は、水中構造物の切断や掘削といった施工に相応しいといえる。

【0043】スタンドオフ距離  $20 < x/D < 70$  の領域では、音響パワー I が低下し、従って残留応力の改善量  $\Delta\sigma$  も小さくなる。第 2 ピークに相当する  $70 < x/D < 140$  の領域では、音響パワー I が増大する。これは、加工対象物に対して、強い力学的作用を及ぼしている証拠であり、結果的に残留応力も広い面積にわたり改善される。

【0044】また、 $\Delta\sigma$  の値も、前出の  $20 < x/D < 70$  の領域に比べると格段に増加する。I 値が小さくノズルの位置が不適切と判断された場合には、第 2 ピークの位置になるように、つまり I 値がおよそ  $10^8 \sim 10^9$  のレベルに達するように、ノズルの位置を再設定すればよい。

【0045】なお、この第 2 ピークの領域は、スタンドオフ距離に対しては比較的鈍感であり、ノズルの位置が目標から多少ずれても I 値は低下せず、目標とする残留応力改善がほぼ達成される。

【0046】一方、加工対象物が円柱の場合は、第 2 ピークの領域を用いれば、噴流が円柱の中心から多少ずれても(噴流の中心軸が円柱の法線と一致していないケースを指す)、音響パワー I は大きな値が得られる。

【0047】これは、円柱の側壁から後流にかけて生じる強い渦流の作用により、キャビテーションが円柱の背後にまで回り込み、円柱背面部の内部応力に影響が及ぶからである。結果的に、円柱体の広い面積部分の残留応力が圧縮側に改善される。

【0048】

【実施例】以下、本発明の実施例を図面に基づいて説明する。

【0049】図 1 は残留応力を改善し応力腐食割れ(SCC)を防止するために、熱交換器の压力容器 3 内部における導管 6 とスタブチューブ 7 の溶接部 8 に対し、キャビテーションを伴う水中水噴流 2 を衝突させてピーニング施工を行う状況を示す実施例である。

【0050】熱交換器の压力容器 3 内の冷却水 4 中において、ノズル 1 から高圧水(イ)を冷却水 4 中に噴射する。压力容器底部 5 から外部へ貫通する導管 6 に対して、AE (アコースティック・エミッション) センサ 10 は、ピーニング施工部すなわち実施例においては導管 6 とスタブチューブ 7 の溶接部 8 に対し、出来るだけ近い位置に設置するようにする。9 は溶接部である。

【0051】図 2 は導管 202 に設置した AE センサ 201 からの信号のフローと、WJP 施工制御・駆動系の系統図をブロック図としてまとめたものである。

【0052】AE センサ 201 からの信号は、信号解析装置 203 において AE 事象が解析され、音響パワー I が求められる。これに基づく指令が、ノズルのマニピレータ駆動用信号プロセッサ 204 およびポンプ駆動用信号プロセッサ 205 に送られ、それぞれマニピレータ制御装置 206 およびポンプ用制御装置 207 を駆動させる。

【0053】噴射圧力の変更が必要になった場合には、ポンプ用制御装置 207 がポンプの吐出圧力を変化させる。あるいは、ノズルの位置決めに問題があると判断された場合には、マニピレータ用制御装置 206 により、ノズルを移動させる。加工条件設定の不備により、加工対象物に壊食(エロージョン)等の破壊現象を生じ

るおそれのある場合には、ポンプを緊急停止し、施工条件を見直すことになる。なお、導管が狭い場合に林立するような場所では、加工対象導管202の隣接導管へも、AEセンサ201を設置すればよい。加工対象導管202で生じた衝突噴流が、隣接する導管群へ再衝突することによる影響を把握できるからである。この場合は、信号解析装置203はマルチチャンネル型を用いる。

【0054】次に、ノズルの位置設定と、キャビテーションを伴う水中水噴流の衝突挙動の関係について述べる。

【0055】図3はノズル301が加工対象円柱体303に近く、すなわちスタンドオフ距離がほぼ第1ピーク相当になっている場合を示している。

【0056】このような状態では、噴流中心の液芯(コア)306が衝突するため、加工対象円柱体303の表層には壊食(エロージョン)が生じやすい。

【0057】従って、残留応力改善を目的とする場合には、ノズル301を後方へ離すか、あるいは高圧水302の噴射圧力を下げる対策をする。

【0058】なお、304は衝突噴流、305はキャビテーションを伴う水中水噴流、307は周囲水である。

【0059】図4には残留応力改善や洗浄に対して適切な第2ピーク相当のスタンドオフ距離 $x$ において、キャビテーションを伴う水中水で、噴流404を加工対象円柱体403へ衝突させた状況を示す。

【0060】なお、401はノズル、402は高圧水、405は周囲水である。

【0061】図5は図4と同様に、第2ピーク相当のスタンドオフ距離 $x$ において、噴流を衝突させているものの、ノズル501の中心軸506が加工対象円柱体503の法線に一致せず、オフセット距離 $e$ が生じた場合を示している。

【0062】このような場合は、加工対象円柱体503の側面から後面にかけて生じる大規模な渦流の作用により、噴流が加工対象円柱体503の背後に回り込む。

【0063】従って、後述するように円柱の背後にまでキャビテーションの影響が及ぶことになり、音響パワー $I$ は、図4の場合と類似したものになる。

【0064】なお、502は高圧水、504はキャビテーションを伴う水中水噴流、505は周囲水である。

【0065】図6はノズル601の位置設定の不備のために、キャビテーションを伴う水中水噴流604が加工対象円柱体603に衝突していない状況を示したものである。

【0066】このようなケースでは、AEセンサから求める音響パワー $I$ のレベルは極端に低くなるか、あるいは隣接する別の導管に設置したAEセンサからの音響パワー $I$ が増大するために容易に見極めがつく。対策として、ノズル601の位置決めを再調整を行う。

【0067】なお、602は高圧水、605は周囲水である。

【0068】次に、本発明の作用を実証するために行った試験の結果について述べる。

【0069】図7に示すように、試験では、平板状の鋼板705の背後にAEセンサ706を設け、ノズル701の位置やノズル701からの噴射条件を変化させる。

【0070】なお、702は高圧水、703はキャビテーションを伴う水中水噴流、704は周囲水である。

10 【0071】図8はスタンドオフ距離 $x$ (ノズル701と鋼板705間の距離)に対する音響パワー $I$ の変化をまとめたものである。

【0072】ノズル701が鋼板に極端に近い場合には、 $I$ のレベルはかなり低い。スタンドオフ距離 $x$ が第1ピーク相当の領域になると、音響パワー $I$ のレベルは急増するが、ノズル701を少し後ろに離すと(スタンドオフ距離 $x$ を少し長くする)、 $I$ は急減してしまう。第2ピークに相当する $x \leq 100 \mu\text{m}$ の領域では、音響パワー $I$ の分布はなだらかな形状となり、また $I$ のレベルも局所的に高くなる第1ピークを除けば相対的に高い。

【0073】この結果は、第2ピークを用いた場合には材料に対して強い力学的影響を与えることを示唆するものである。

【0074】図9は円柱を噴流の衝突対象とした結果を示すものであり、音響パワー $I$ をスタンドオフ距離に対する結果としてまとめたものである。

【0075】横軸のスタンドオフ距離 $x$ は、第2ピークにおけるスタンドオフ距離 $x(*)$ で割ることにより無次元化している。また、縦軸の音響パワー $I$ も、第2ピークにおいて得られる音響パワー $I(*)$ で割ることにより無次元化して表している。

【0076】この結果から、 $I/I(*)$ も2つのピークを有する分布となることが分かる。また、噴流が衝突しない場合、つまり図6のような場合には、 $I/I(*)$ のレベルもかなり低くなってしまう。

【0077】図10ないし図13は、それぞれ図3ないし図6に示した噴流の衝突条件に対して、円柱の表面上に発生する衝撃圧分布を示すものである。

40 【0078】このような衝撃圧分布は、感圧フィルムを円柱表面上に貼付する方法により求めることができる。

【0079】図10は第1ピークにはほぼ相当するスタンドオフ距離で噴流を加工対象円柱体303に衝突させた場合の衝撃圧分布である。衝撃圧分布901は、噴流の衝突中心に局所的に集中するものとなる。

【0080】一方、図11には、第2ピークのスタンドオフ距離でピーニング施工をした場合の衝撃圧分布を示す。

50 【0081】衝撃圧分布1001は、加工対象円柱体403の真後ろ、すなわちノズルの位置と正反対方向には

発生していないものの、加工対象円柱体403の表面のかなり広い領域において発生することがわかる。

【0082】図12はノズルの中心軸が加工対象円柱体503の法線に一致していない場合の施工例であるが、ノズルの設置位置に対してオフセットの生じた方向へ偏るものの、加工対象円柱体503の側面を中心として、加工対象円柱体403のかなり広い部分において衝撃圧が発生している。なお、1101は衝撃圧分布を示す。

【0083】図13は図6に示すように、噴流が加工対象円柱体に衝突しなかった場合の結果を示すものである。加工対象円柱体603の側面に、僅かに衝撃圧分布1201が見られるに過ぎない。

【0084】図14には上記したようにして求めた衝撃圧 $P_{sh}$ とAEセンサから求めた音響パワー $I$ の相関をまとめて示す。

【0085】横軸の衝撃圧 $P_{sh}$ は、第2ピークにおける最大衝撃圧 $P_{sh}^*$ により割って、 $P_{sh}/P_{sh}^*$ として無次元表記している。縦軸も、図9と同様に第2ピークにおける最大衝撃圧 $I^*$ を基準として無次元表記されている。

【0086】これらのデータは、スタンドオフ距離を変化させて行った全実験の結果をまとめたものである。 $P_{sh}/P_{sh}^* \sim I/I^*$ の結果から、 $I/I^*$ は衝撃圧 $P_{sh}/P_{sh}^*$ に対し一義的にまとまり、 $I/I^*$ は $P_{sh}/P_{sh}^*$ に対しはっきりとした相関のあることが確認された訳である。

【0087】図15は音響パワー $I/I^*$ と残留応力改善量の関係をまとめたものである。いずれも噴流の衝突時間を一定として求めた実験結果である。AEセンサにより求めた音響パワー $I$ は、第2ピークにおける音響パワー $I^*$ を基準として無次元表記した。

【0088】また、ピーニング施工後に得られた圧縮残留応力 $\sigma_1$ から、施工前の引っ張り応力 $\sigma_2$ を引くことにより求めた残留応力改善量 $\Delta\sigma = \sigma_1 - (-\sigma_2)$ も、第2ピークにおける残留応力改善量 $\Delta\sigma^*$ を基準として無次元化されている。 $\Delta\sigma/\Delta\sigma^*$ の結果は、 $I/I^*$ に対してはっきりと直線状に求められ、十分な相関関係のあることが認められる。

【0089】この結果から、音響パワー $I$ のレベルの監視は、施工中における残留応力の改善効果を確保するために、大変に有効な手段であることが分かる。

【0090】本発明は本分中で実施例として説明した軽水炉(BWR)下部における導管溶接部の残留応力改善のみならず、他の用途にも広く利用することができる。ここでは、2例を挙げる。

【0091】(1) 海水における構造物の水中施工(例えば、切断や開孔)においても、同一部材であれば界面に出たその構造物にAEセンサを設けることで、本発明になる技術をほぼそのまま適用することができる。十分な防水保護をすれば、施工部に近い海水中の位置にAE

センサを設置することも可能である。

【0092】(2) 水中水噴流を用いて、船舶底部における付着生物のはつりや洗浄を行う場合、底板に損傷を与えないように監視する技術へも本発明を適用することができる。

【0093】

【発明の効果】本発明になるウォータージェットピーニング施工装置による効果をまとめると、次のようになる。

10 【0094】(1) 容器内における加工対象構造物に対し、水中において噴流が適正な位置で衝突しているか否かを確認することができる。

【0095】(2) 所定の施工後に、加工対象構造物の残留応力が十分に改善されているか否かを確認することができる。

【0096】(3) 上記(1)の効果に関連し、ノズルの位置決め等の設定が容易になり、施工時間を大幅に短縮することができる。

20 【0097】(4) 上記(1)および(2)の効果に関連し、水噴流の噴射条件を適宜制御し、加工効率が最大になるようにポンプ等を操作することが可能になる。

【0098】(5) 上記(1)および(2)の効果に関連し、ノズルの位置決め不適切やポンプの誤動作等に起因するピーニング加工対象物のエロージョン(壊食)の発生を未然に防ぐことが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】熱交換器に適用した本発明に係るウォータージェットピーニング施工装置の概念図である。

30 【図2】AEセンサ、そのデータ処理系およびウォータージェットピーニング施工装置の制御系の系統図である。

【図3】ウォータージェットピーニング(WJP)用ノズルが熱交換器の管体に近づき過ぎた状態を示す模式図である。

【図4】噴流が管体に対して適切な位置で衝突する状態を示す模式図である。

【図5】WJP用ノズルが熱交換器の管体に対してオフセットのある状態で位置決めした場合を示す模式図である。

40 【図6】噴流が管体に接触しない状態を示す模式図である。

【図7】AEを用いる試験法の概念図である。

【図8】AEセンサからのイベント信号を音響パワーとして整理した結果の例を示す特性図である。

【図9】音響パワーとスタンドオフ距離の関係を示す特性図である。

【図10】図3に示した施工状態において、管体が発生する圧力分布を示す模式図である。

50 【図11】図4に示した施工状態の管体が発生する圧力分布を示す模式図である。

11

【図12】図5に示した施工状態において、管体が発生する圧力分布を示す模式図である。

【図13】図6に示した施工状態において、管体が発生する圧力分布を示す模式図である。

【図14】管体における衝撃圧とAEの音響パワーの相関を示す特性図である。

【図15】AEの音響パワーと残留応力の改善効果の関係を示す特性図である。

【図16】WJPに用いるノズルの一例を示す断面図である。

【図17】WJPに用いるノズルの他の例を示す断面図である。

【図18】水中の高速水噴流に発生する衝撃圧分布を示

12

す模式図である。

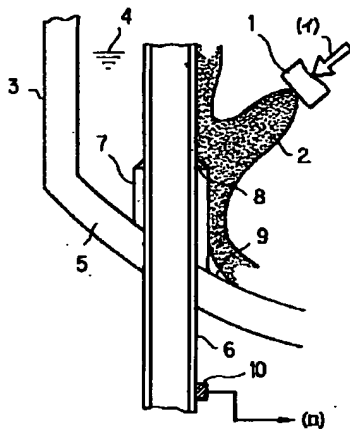
【図19】水中の高速水噴流の現象を描いた模式図である。

【符号の説明】

- 1 ノズル
- 2 キャビテーションを伴う水中水噴流
- 3 熱交換器の圧力容器
- 4 冷却水
- 5 圧力容器底部
- 6 導管
- 7 スタブチューブ
- 8, 9 溶接部
- 10 AEセンサ

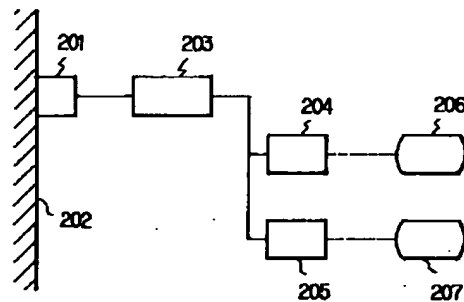
【図1】

【図1】



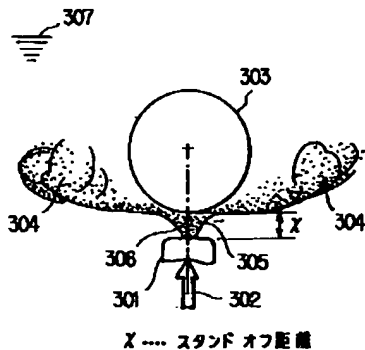
【図2】

【図2】



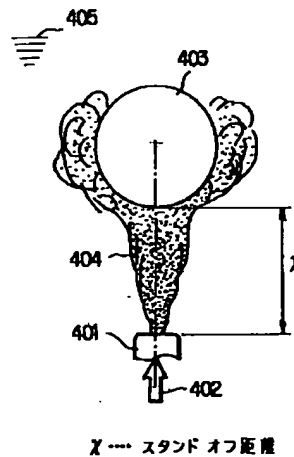
【図3】

【図3】



【図4】

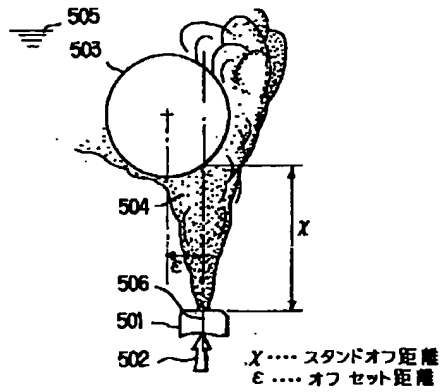
【図4】





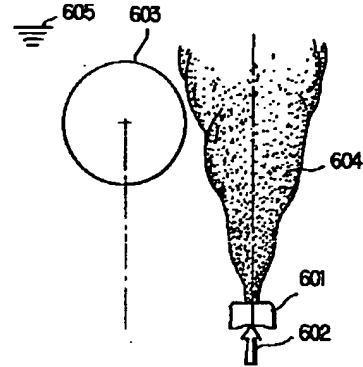
【図5】

【図5】



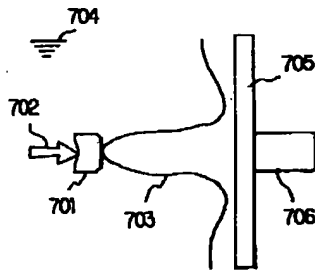
【図6】

【図6】



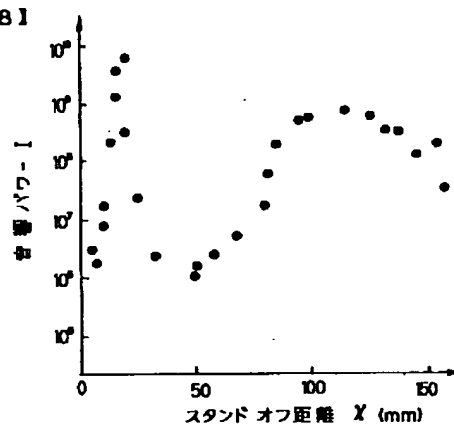
【図7】

【図7】



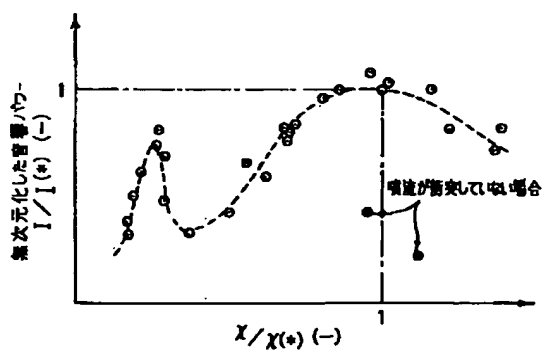
【図8】

【図8】



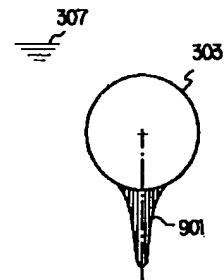
【図9】

【図9】



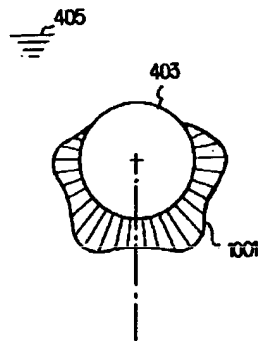
【図10】

【図10】



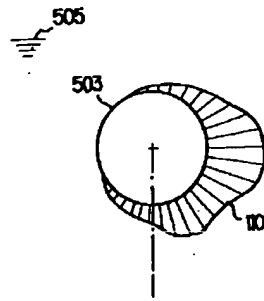
【図11】

【図11】



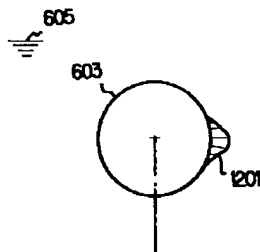
【図12】

【図12】



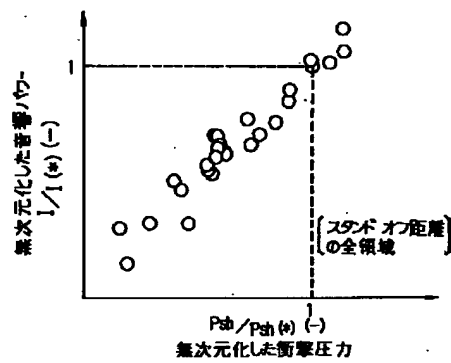
【図13】

【図13】



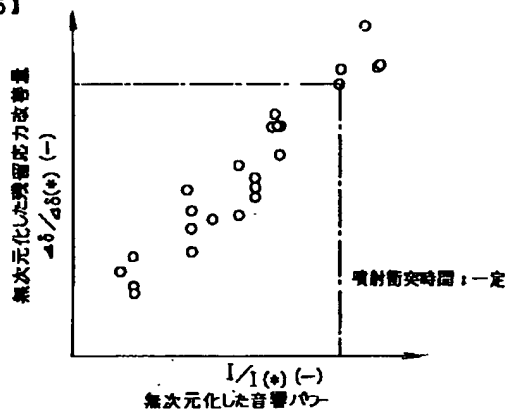
【図14】

【図14】



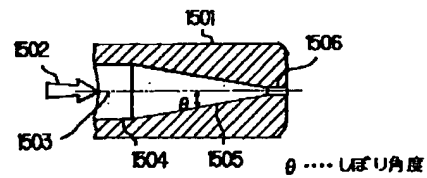
【図15】

【図15】



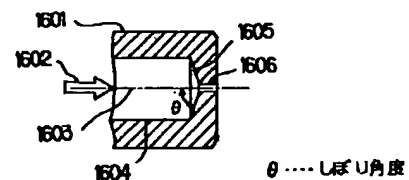
【図16】

【図16】



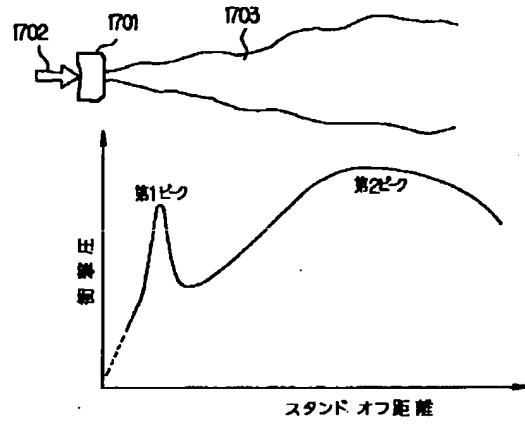
【図17】

【図17】

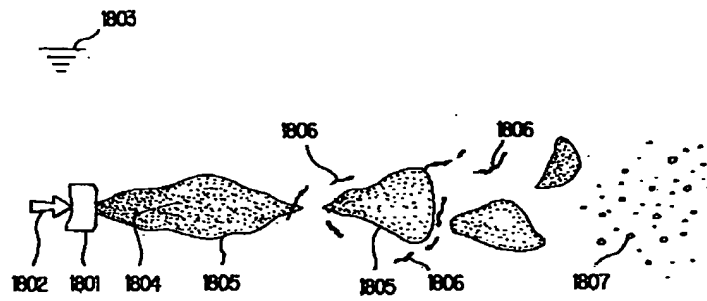


【図18】

【図18】



【図19】



【図19】